

段階エッチングによるモナザイトのフィッション・トラック分析 —南極を含む複数の未知試料への適用—

Fission-track analysis in monazite by step etching: applying to unknowns including the Antarctica samples

浅井勇人*・福田将真**・田上高広*

Hayato Asai*, Shoma Fukuda**, Takahiro Tagami*

*：京都大学, Kyoto University

**：日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

はじめに

近年、新たな熱年代計としてモナザイトフィッション・トラック (MFT) 法の基礎研究が行われている (Jones et al., 2019)。MFT法は既存の手法に比べてより低い閉鎖温度 (<50°C) を持つことが期待されており (Weise et al., 2009; Jones et al., 2021)、地殻表層における熱史解明への有用性が期待されている。しかし、エッチングの終了条件の確立、アニーリング特性の解明、初期長の決定など、依然として課題も多く実用化には至っていない。また、FT長の測定例の数は少なく (Jones et al., 2023; Jepson et al., 2025)、対象となった試料の形成年代も原生代、白亜紀、始新世と限られている。そこで本研究では、モナザイトにおけるエッチング特性およびアニーリング特性の理解に向けて、様々な形成年代を持つ天然のモナザイトを対象に段階エッチングを行い、自発トラックの長さ分布の測定及び比較を実施した。

分析試料と実験手法

本研究では、南極から採取されたカンブリア紀のペグマタイト (ARP04)、同じく南極から採取された先カンブリア紀の斜長石花崗岩 (LANG1)、屋久島から採取された中期中新世の花崗岩 (YYG02) から分離したモナザイトを用いる。

エッチングは、6MのHClを用いて

90°Cで行った (Jones et al., 2019)。

Nakajima et al. (2024)を参考に、温度管理にはウォーターバスを使用し、各試料ごとに適当なタイムステップでエッチングを区切る段階エッチングを行った。エッチング後の粒子の観察およびFT長の測定には、Autoscan Systems製のTrackscan Plus Professionalを用いた。日本原子力研究開発機構東濃地科学センターにて試料の前処理、研磨、段階エッチングおよび画像撮影を行い、撮影した画像を用いてFT長の測定を京都大学にて行った。FT長の測定は、全て表面トラックと交差しているconfined track (TINT: Track in Track)を対象として行った。

結果と考察

段階エッチングによるFT長の時間変化を図1に示す。ARP04では、ほとんどのFTにおいて、30~45分でのFT長の増加率よりも45~60分での増加率の方が小さくなった。LANG1のFT長の時間変化は、ARP04の45~60分での時間変化とよく似てほとんど増加しない結果となった。また、YYG02では150~180分での増加率より180~210分での増加率の方が小さくなった。このような段階エッチングによるFT長の時間変化については、アパタイトにおける先行研究で報告されるように、FTの終端までエッチングされるとFT長の時間変化率は著しく低下し、その後徐々に成長を続けることが分

かっている（例えば，Tagami and O'Sullivan, 2005）．モナザイトでも同様のエッチング特性を示すことを仮定すると，TINT に対しては，ARP04 と LANG1 では 45～60 分，YYG02 では 180～210 分が適当なエッチング時間である可能性がある．また，形成年代が古いほどより長いエッチング時間を要する結果となった．この結果は，化学組成に試料間で差がないことを仮定すると，Nakajima et al. (2024)で提案された放射線損傷の蓄積量とエッチング時間の関係と整合的なものとなっている．

図 2 に各試料でのエッチングの最終段階における FT 長分布を示す．ARP04 と LANG1 は共に単峰性の短い方に裾が伸びた形状を示した．このような形状は，アパタイトなどでは，試料が PAZ 付近での徐冷を経験したと解釈される．YYG02 は，単峰性に近い形状を示してはいるものの，測定した FT の本数が少ないため不明瞭な分布となった．既往研究では，FT 長の測定は Jones et al. (2023)と Jepson et al. (2025)で報告されており，これらの結果と比較すると，平均長が Jones et al.(2023)よりわずかに長く，Jepson et al. (2025)よりわずかに短い結果となった．エッチングの基準が統一されておらず正確な比較はできないものの，おおよそ先行研究と整合的な分布を示した．また，これらの先行研究では，MFT 年代値の計算において，仮の初期長として Jones et al. (2021)で計算された ^{252}Cf の平均トラック長 $10.6\ \mu\text{m}$ を使用している．しかし，今回の結果では $10.6\ \mu\text{m}$ を超える FT がいくつも観察されており，モナザイトにおける自発 FT の初期長は $10.6\ \mu\text{m}$ よりも長い可能性が高い．ただし，今回は FT の幅の測定をしていないため，厳密な比較はできないことに留意したい．

今後は，FT の幅と密度の測定やエッチングの時間ステップを増やすことにより，より厳密にエッチングの終了条件を決めていく必要がある．

謝辞

本研究は，資源エネルギー庁受託事業の「令和 6 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業」の成果の一部を使用した．また，本研究に使用した南極の試料は金沢大学の長谷部徳子教授および富山大学の石川尚人教授より，屋久島の試料は徳島大学の安間了教授よりご提供いただいた．

引用文献

- Jepson, G., Carrapa, B., Jones, S., Kohn, B. P., Gleadow, A. J. W., George, S. W. M., Howlett, C. J., Gallagher, K., Frickenstein, A. N., Gehrels, G., Triantafyllou, A., 2025, An assessment of monazite fission-track thermochronology as a proxy for low-magnitude cooling, Catalin-Rincon Metamorphic Core Complex, AZ, USA. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **26**, e2024GC011881.
- Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B., 2021, Thermal annealing of implanted 252 Cf fission tracks in monazite. *Geochronology*, **3**, 89-102.
- Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B., Areddy, S.M., 2019, Etching of fission tracks in monazite: An experimental study. *Terra Nova*, **31**, 179-188.
- Jones, S., Kohn, B., Gleadow, A., Skrzypek, E., Tagami, T., 2023, Low-temperature thermochronology of Ryoke belt granitoids, SW Japan: New insights into the recent cooling history from monazite fission-track dating. *Tectonophysics*, **864**, 229998.

Nakajima, T., Fukuda, S., Sueoka, S.,
Niki, S., Kawakami, T., Danhara, T.,
Tagami, T., 2024, Inverse correlation
between radiation damage and
fission-track etching time on
monazite. *Geochronology*, **6**, 313-323.

Tagami, T. and O'Sullivan, P. B., 2005,
Fundamentals of fission-track
thermochronology. *Reviews in
mineralogy and geochemistry*, **58**, 19-47

Weise, C., van den Boogaart, K. G.,
Jonckheere, R., Ratschbacher, L.,
2009, Annealing kinetics of Kr-tracks
in monazite: Implications for fission-
track modelling. *Chemical Geology*,
260, 129-137.

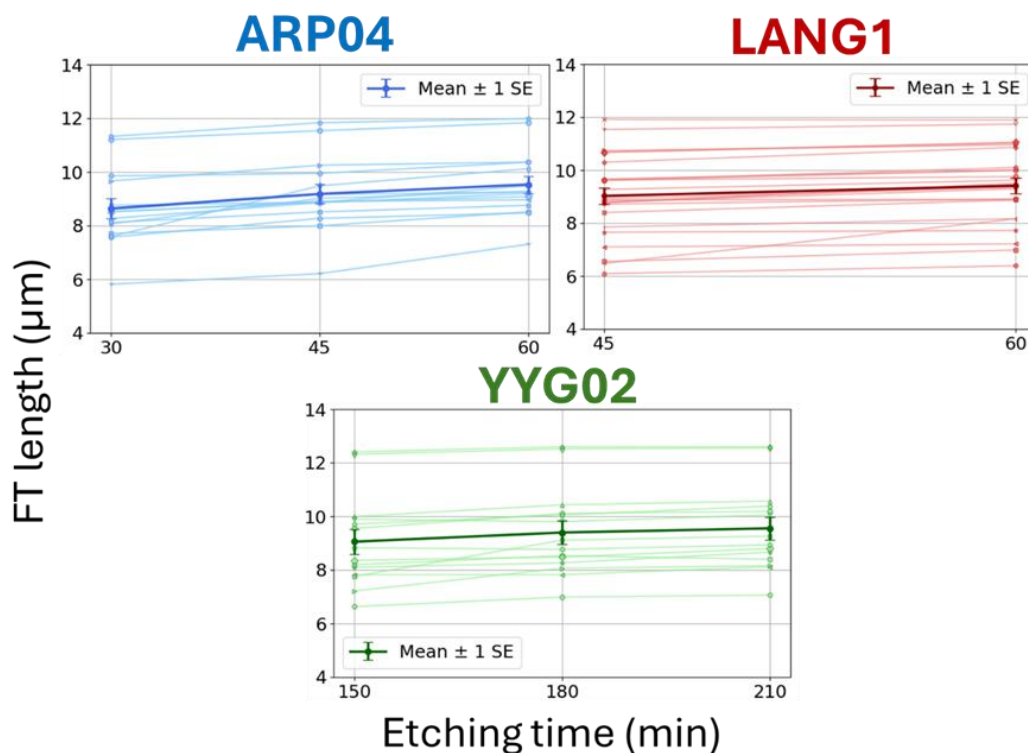


図1 各試料における FT 長のエッチング時間による変化

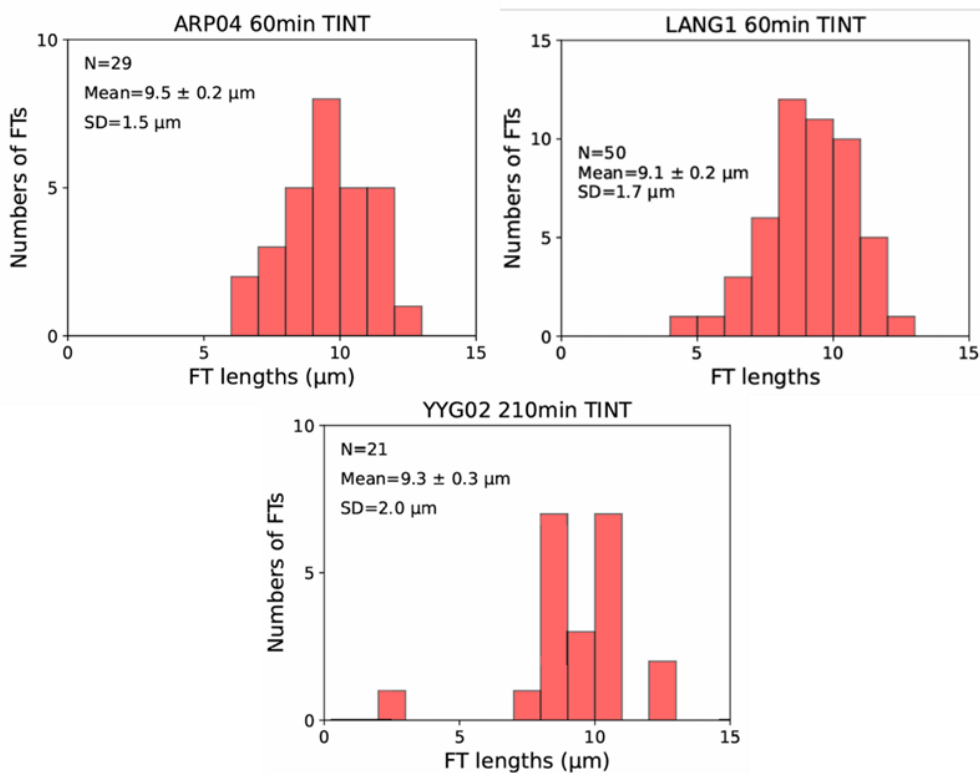


図2 各試料におけるエッチングの最終段階での FT 長分布